

02

## Особенности измерения теплового сопротивления микросборки мощных нитрид-галлиевых НЕМТ с кремниевым MOSFET, включенных по каскодной схеме

© В.И. Смирнов<sup>1,2</sup>, В.А. Сергеев<sup>1</sup>, А.А. Гавриков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

e-mail: a.gavrikoff@gmail.com

Поступила в редакцию 07.05.2025 г.

В окончательной редакции 07.05.2025 г.

Принята к публикации 24.10.2025 г.

Исследованы теплоэлектрические процессы в GaN-транзисторах с каскодной структурой, состоящей из последовательно соединенных НЕМТ и MOSFET. Показана возможность определения сопротивления каналов НЕМТ и MOSFET по результатам измерения вольт-амперных характеристик каскодной структуры в различных режимах включения и приведены оценки тепловой мощности, рассеиваемой в обоих кристаллах. Компоненты теплового сопротивления транзистора определялись с помощью аппаратно-программного комплекса, реализующего модуляционный метод измерения с разогревом объекта импульсами греющего тока с широтно-импульсной модуляцией по гармоническому закону. Полученные значения компонент теплового сопротивления хорошо согласуются с паспортными данными транзистора.

**Ключевые слова:** нитрид-галлиевый транзистор, каскодная структура, НЕМТ, MOSFET, тепловое сопротивление, модуляционный метод, тепловое излучение.

DOI: 10.61011/OS.2025.10.61939.8037-25

Нитрид галлия (GaN), широко востребованный материал для создания мощных и СВЧ полупроводниковых приборов, обладает рядом уникальных свойств. Высокие значения скорости насыщения электронов и электрической прочности позволили создать на основе этого материала НЕМТ-транзисторы (НЕМТ — high electron mobility transistor) с рабочими частотами в десятки гигагерц и выходной мощностью в сотни ватт [1]. Большая рассеиваемая в этих транзисторах мощность определяет необходимость эффективного отвода тепла от активной области прибора. Количественной оценкой эффективности отвода тепла от активной области полупроводниковых приборов является тепловое сопротивление „переход–корпус“  $R_{Tjc}$ , определяемое как отношение разности температур  $T_j$   $p-n$ -перехода и  $T_c$  корпуса прибора к рассеиваемой в нем тепловой мощности [2]:

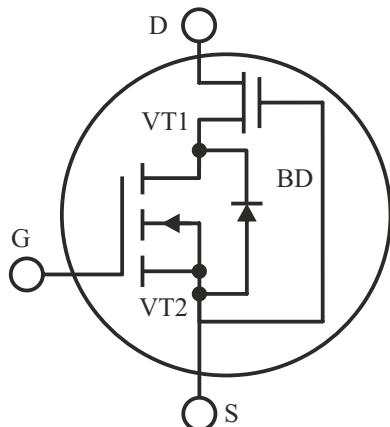
$$RT_{jc} = (T_j - T_c)/P,$$

где  $P$  — рассеиваемая в приборе мощность.

Тепловое сопротивление  $R_{Tjc}$  определяет предельно допустимую рассеиваемую мощность прибора — если рассеиваемая транзистором мощность превышает предельно допустимое значение, в транзисторной структуре возникает тепловой пробой. Реальные значения теплового сопротивления  $R_{Tjc}$  могут сильно отличаться от расчетных, поэтому этот параметр необходимо контролировать с достаточно высокой точностью. Большинство

методов измерения теплового сопротивления основано на измерении переходной тепловой характеристики (ПТХ) [3]. При измерении ПТХ транзистор разогревается импульсами греющего тока  $I_{heat}$  с нарастающей по логарифмическому закону длительностью. Температура перехода  $T_j$  измеряется в паузах между импульсами с временной задержкой, необходимой для завершения переходных электрических процессов, происходящих при переключении транзистора из режима нагрева в режим измерения температуры, по изменению температурочувствительного параметра (ТЧП), в качестве которого для НЕМТ- и MOSFET-транзисторов (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), в частности, может быть использовано сопротивление канала RDS(on), линейно зависящее от температуры [4].

Структура НЕМТ с целью улучшения основных электрических, частотных и энергетических характеристик непрерывно совершенствуется. На начальном этапе своего развития НЕМТ были нормально открытые, т.е. при напряжении на затворе  $U_{GS} = 0$  канал транзистора был открыт. Это создавало определенные неудобства разработчикам электронных средств с использованием мощных НЕМТ. Чтобы сделать их нормально закрытыми, в цепи затвора транзистора формируют дополнительный  $p-n$ -переход [5]. Альтернативным вариантом является создание каскодной структуры, в которой НЕМТ-транзистор объединяют с низковольтным кремниевым MOSFET-транзистором с низким сопро-



**Рис. 1.** Каскодная схема нитрид-галлиевого транзистора: VT1 — НЕМТ-транзистор; VT2 — кремниевый MOSFET-транзистор; BD — антипараллельный диод.

тивлением канала [6]. Управление НЕМТ-транзистором осуществляется напряжением на затворе MOSFET, а ток протекает последовательно через каналы НЕМТ и MOSFET. Это усложняет анализ теплоэлектрических процессов в такой двухкристальной системе, поскольку значения сопротивлений открытого канала  $R_{DS(on)}$  и их температурные коэффициенты для НЕМТ и MOSFET могут существенно различаться.

Объектом исследования являлся мощный нитрид-галлиевый транзистор NTP8G206N производства ON Semiconductor (рассеиваемая мощность  $P_D = 96 \text{ W}$ , ток стока  $I_D = 17 \text{ A}$ , время задержки включения  $t_{d(on)} = 6.2 \text{ ns}$ , тепловое сопротивление  $R_{T jc} = 1.5 \text{ K/W}$ ). Транзистор имеет каскодную структуру (рис. 1), включающую в себя собственно GaN НЕМТ (VT1) и низковольтный кремниевый MOSFET (VT2), исток которого соединен с затвором НЕМТ-транзистора, а исток последнего — со стоком MOSFET. Между истоком и стоком MOSFET-транзистора включен антипараллельный диод BD (body diode), который не влияет на работу транзистора в обычном режиме, но выполняет защитные функции при работе, например, на индуктивную нагрузку.

Транзисторы с каскодной структурой обычно содержат два кристалла: GaN-кристалл с НЕМТ и кристалл кремния с MOSFET и антипараллельным диодом. Иногда для улучшения характеристик транзистора вместо антипараллельного диода используют внешний быстродействующий карбид-кремниевый диод [7]. Кристаллы смонтированы в пластмассовом корпусе TO220, имеющим размеры  $10 \times 16 \times 4.5 \text{ mm}$ . Для определения количества кристаллов и их места расположения в исследуемом транзисторе без вскрытия корпуса инфракрасным микроскопом PI 640 было измерено тепловое излучение транзистора (рис. 2).

Термограмма на рис. 2, a получена при пропускании импульса тока  $I_{heat} = 5 \text{ A}$  длительностью  $\tau = 300 \text{ ms}$  от истока к стоку транзистора при напряжении на

затворе  $U_{GS} = 0 \text{ В}$ , т. е. при закрытом канале MOSFET. Из профиля распределения температуры, показанного под термограммой, следует, что при протекании импульса тока через антипараллельный диод и канал НЕМТ оба кристалла нагреваются примерно одинаково, а третьего кристалла с карбид-кремниевым диодом в исследуемом объекте нет.

Термограмма на рис. 2, b получена при открытом канале MOSFET ( $U_{GS} = 6 \text{ В}$ ) и импульсе тока  $I_{heat} = 10 \text{ A}$  и  $\tau = 100 \text{ ms}$ , протекающем от стока к истоку через последовательно соединенные каналы НЕМТ и MOSFET. В этом случае один из кристаллов нагревается заметно сильнее, что определяется различием сопротивлений каналов НЕМТ и MOSFET. Для корректного определения теплового сопротивления обоих кристаллов требуется знать электрические сопротивления обоих каналов.

Сопротивления канала НЕМТ можно определить на основе анализа вольт-амперной характеристики (ВАХ) транзистора при протекании тока от истока к стоку при закрытом канале MOSFET ( $U_{GS} = 0$ ). В этом случае ток протекает через антипараллельный диод и канал НЕМТ. Напряжение  $U_{SD}$  складывается из напряжения на  $p-n$ -переходе диода, которое для кремниевых диодов находится в диапазоне от 600 до 800 мВ, и падения напряжения на канале НЕМТ. Вольт-амперная характеристика диода описывается формулой Шокли [8]

$$I = I_S [\exp(qU/mkT) - 1], \quad (1)$$

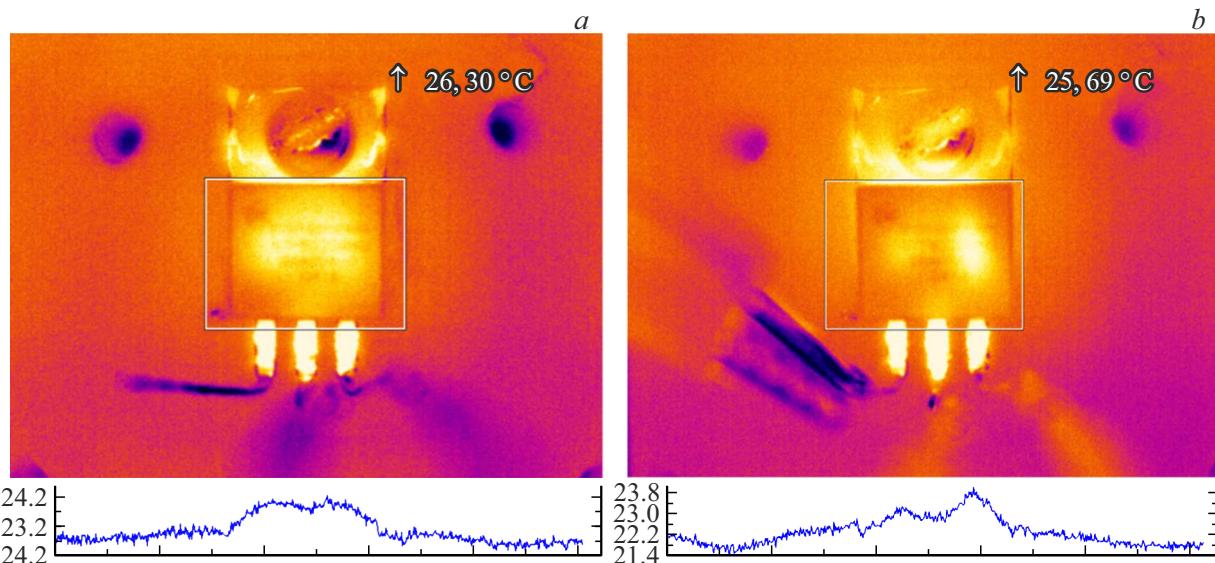
где  $I_S$  — ток насыщения,  $m$  — коэффициент неидеальности  $p-n$ -перехода диода,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура перехода.

При  $qU/kT > 8$  единицей в формуле (1) можно пренебречь, а  $m \approx 1$  [8], и ВАХ диода в полулогарифмическом масштабе будет линейной:

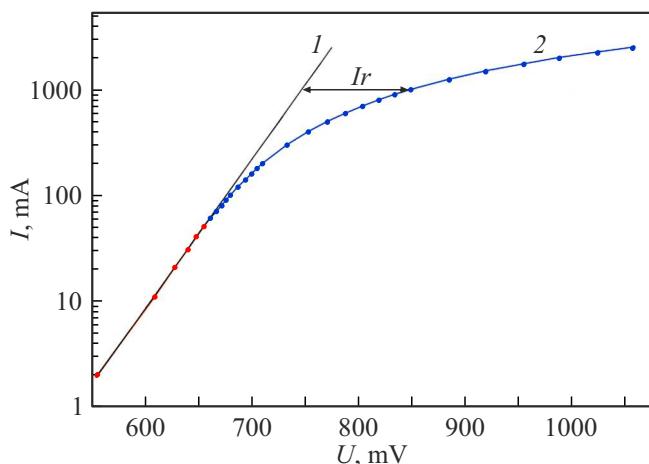
$$\ln I = \ln I_S + qU/kT. \quad (2)$$

Согласно паспорту, сопротивление канала транзистора NTP8G206N примерно равно  $150 \text{ m}\Omega$ , и при протекании тока  $100 \text{ mA}$  падение напряжения на канале НЕМТ не превысит 15 мВ, что существенно меньше падения напряжения на диоде. Поэтому при расчете линейной регрессии (2) (линия 1 на рис. 3) использовались точки ВАХ при  $I < 60 \text{ mA}$ .

С увеличением тока вклад сопротивления канала НЕМТ в ВАХ транзистора возрастает, и для описания ВАХ транзистора в формуле (1) необходимо заменить напряжение  $U$  на  $(U - Ir_{CH})$ , где  $r_{CH}$  — сопротивление канала НЕМТ. Измеренная ВАХ транзистора с учетом падения напряжения на сопротивлении канала НЕМТ приведена на рис. 3 (кривая 2). Из сравнения зависимостей 1 и 2 можно найти сопротивление канала НЕМТ. Так, при токе  $I = 1000 \text{ mA}$  разность падений напряжения на диоде и транзисторе составляет 105 мВ (рис. 3), что соответствует сопротивлению канала НЕМТ  $r_{CH} = 105 \text{ m}\Omega$ .

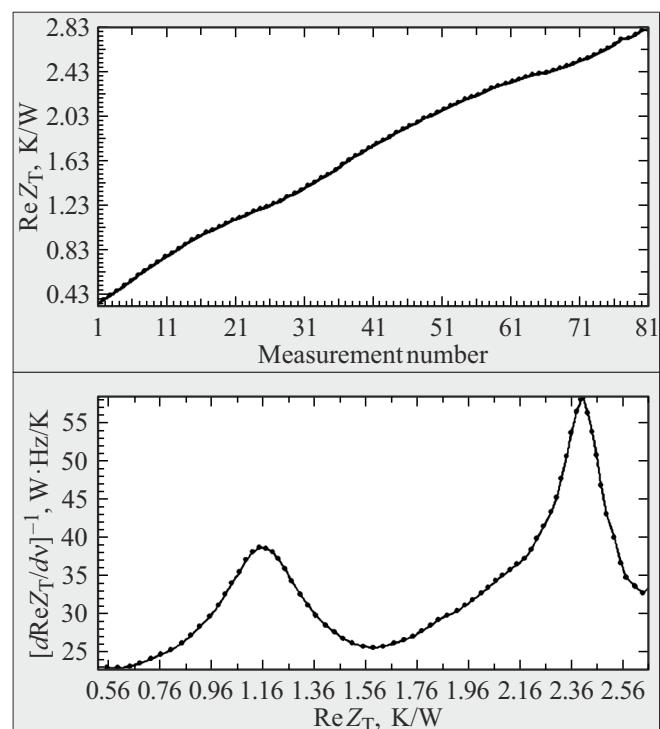


**Рис. 2.** Термограммы нагретых кристаллов транзистора NTP8G206N (внизу показаны профили распределения температуры вдоль оси, проходящей через центры кристаллов). В правом углу термограмм приведены максимальные значения температуры в поле измерения. Пояснения в тексте.



**Рис. 3.** Вольтамперная характеристика транзистора в полулогарифмическом масштабе: 1 — ВАХ диода, 2 — ВАХ с учетом падения напряжения на сопротивлении канала НЕМТ. Пояснения в тексте.

По результатам измерения ВАХ исследуемого транзистора при открытом MOSFET суммарное сопротивление каналов НЕМТ и MOSFET получилось равным  $132 \text{ m}\Omega$ , откуда следует, что сопротивление  $r_{\text{CH}}$  канала MOSFET составляет  $27 \text{ m}\Omega$ . Следовательно, при измерении теплового сопротивления транзистора необходимо учитывать, что около 20% выделяемой в транзисторе тепловой мощности рассеивается не в НЕМТ, а в MOSFET. Этот результат несколько отличается от результатов [9], согласно которым сопротивления каналов НЕМТ и MOSFET в каскодной структуре различаются на порядок.



**Рис. 4.** Частотная зависимость вещественной части теплового импеданса (вверху) и результат ее обработки (внизу). Пояснения в тексте.

Измерение теплового сопротивления производилось модуляционным методом при нагреве объекта импульсами греющего тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ-импульсами) по гармоническому закону [10]. При пропускании через объект ШИМ-импульсов тока

в нем рассеивается переменная тепловая мощность  $P(t)$  с амплитудой первой гармоники  $P_1$ , что вызывает колебания температуры перехода  $T_j(t)$  с амплитудой первой гармоники  $T_{j1}$ , сдвинутой по фазе относительно гармоники мощности на угол  $\varphi$ . Отношение амплитуд  $T_{j1}$  и  $P_1$  определяет модуль теплового импеданса  $Z_T$ , а отношение мнимой  $\text{Im}T_j$  и вещественной  $\text{Re}T_j$  фурье-компонент температуры перехода на частоте модуляции — тангенс фазы  $\varphi$  теплового импеданса:

$$Z_T = T_{j1}/P_1; \quad \text{tg } \varphi = \text{Im}T_j/\text{Re}T_j.$$

На основе анализа зависимости вещественной части теплового импеданса  $\text{Re}Z_T(\nu)$  от частоты модуляции греющей мощности можно определить компоненты теплового сопротивления всего пути, по которому распространяется тепловой поток от нагретого канала к корпусу и далее в радиатор. Наличие компонент теплового сопротивления на зависимости  $\text{Re}Z_T(\nu)$  проявляется в виде пологих участков и точек перегиба, что может быть выявлено с помощью дифференцирования  $\text{Re}Z_T(\nu)$  по частоте модуляции.

Измерение теплового сопротивления  $R_{Tjc}$  осуществлялось с помощью аппаратно-программного комплекса [11], реализующего модуляционный метод. Транзистор нагревался ШИМ-импульсами тока, протекающего от стока к истоку через каналы обоих транзисторов HEMT и MOSFET. Период следования импульсов составлял 500  $\mu\text{s}$ . Модуляция длительности импульсов осуществлялась в диапазоне от 250 до 750  $\mu\text{s}$ . В паузах между греющими импульсами с временной задержкой 80  $\mu\text{s}$  измерялась температура  $T_j$  по изменению ТЧП, температурный коэффициент которого равен 0.1 mV/K. Измерения проводились при греющем токе 16 А. Измерение частотной зависимости теплового импеданса осуществлялось в диапазоне от 40 до 0.025 Hz с равномерным шагом по логарифмической шкале частот (20 точек на декаду). При вычислении теплового сопротивления кристалла HEMT учитывалась только тепловая мощность, рассеиваемая в этом кристалле. Результаты измерения зависимости вещественной части теплового импеданса  $\text{Re}Z_T(\nu)$  от частоты модуляции греющей мощности представлены на верхней панели рис. 4. На нижней панели представлена зависимость  $[d\text{Re}Z_T/d\nu]^{-1}$  от  $\text{Re}Z_T$ . Положение максимумов относительно оси абсцисс определяет значения компонент теплового сопротивления. Первая компонента  $R_{T1} = 1.16 \text{ K/W}$  соответствует тепловому сопротивлению „переход–корпус“ HEMT-транзистора, что хорошо согласуется с паспортными данными, вторая компонента  $R_{T2} = 2.40 \text{ K/W}$  — тепловому сопротивлению „переход–радиатор“.

Приведенные в работе результаты показывают возможность оценки мощности, рассеиваемой каждым из кристаллов каскодной структуры, а также возможность применения модуляционного метода для измерения компонент теплового сопротивления таких транзисторов.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] T.R. Lenka, P.T. Nguyen Hieu. *HEMT Technology and Applications* (Springer, Singapore, 2022). DOI: 10.1007/978-981-19-2165-0
- [2] F. Oettinger, D. Blackburn. *Thermal resistance measurements* (Government Printing, U.S., 1990).
- [3] M. Rencz, G. Farkas, A. Poppe. *Theory and Practice of Thermal Transient Testing of Electronic Components* (Springer, Switzerland, 2023). DOI: 10.1007/978-3-030-86174-2
- [4] А. Строгонов, М. Харченко, А. Ханин. Электроника: Наука. Технология. Бизнес, **8**, 00229, 2023.
- [5] X. Hu, G. Simin, J. Yang. Electron. Lett., **36** (8), 753 (2000). DOI: 10.1049/el:20000557
- [6] X. Huang, W. Du, F.C. Lee, Q. Li, Z. Liu. IEEE Trans. Power Electron., **31** (1), 593 (2015). DOI: 10.1109/TPEL.2015.2398856
- [7] C. Wu et al. Energies, **14** (12), 3477 (2021). DOI: 10.3390/en14123477
- [8] S.M. Sze, M.K. Lee. *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley, 2006).
- [9] G. Farkas, Z. Sarkany, M. Rencz. In: *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (Nuremberg, Germany, 2016), pp. 1-8. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7499411/metrics#metrics>
- [10] V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov, A.M. Shorin. Microelectronics Reliability, **80**, 205–212 (2018). DOI: 10.1016/j.microrel.2017.11.024
- [11] V.I. Smirnov, A.A. Gavrikov. IEEE Trans. Instr. Measur., **73**, 1–9 (2024). DOI: 10.1109/TIM.2023.3345913